

В. Г. ЯГУП, К. В. ЯГУП

ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Стаття присвячена розробці і дослідженню методів оптимізації режимів систем електропостачання електротехнічних комплексів і систем з несиметричними і нелінійними навантаженнями з метою підвищення енергетичних показників і розрахунку параметрів симетро-компенсуючих пристроїв та силових активних фільтрів, що забезпечують оптимальні режими з допомогою математичних і комп'ютерних моделей і з застосуванням пошукової оптимізації, реалізованої з використанням сучасних програмних засобів комп'ютерної математики.

Ключові слова: система електропостачання, несиметрія струмів і напруг, реактивна потужність, симетро-компенсуючий пристрій, силовий активний фільтр, змінні оптимізації, критерій оптимізації.

В. Г. ЯГУП, К. В. ЯГУП

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Статья посвящена разработке и исследованию методов оптимизации режимов систем электроснабжения электротехнических комплексов и систем с несимметричными и нелинейными нагрузками с целью повышения энергетических показателей и расчета параметров симетри-компенсирующих устройств и силовых активных фильтров, обеспечивающих оптимальные режимы с помощью математических и компьютерных моделей и с применением поисковой оптимизации, реализованной с использованием современных программных средств компьютерной математики.

Ключевые слова: система электроснабжения, несимметрия токов и напряжений, реактивная мощность, симметри-компенсирующее устройство, силовой активный фильтр, переменные оптимизации, критерий оптимизации.

V. G. YAGUP, K. V. YAGUP

APPLICATION OF OPTIMIZATION METHODS FOR SOLVING THE PROBLEM OF ENHANCING ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC POWER ENGINEERING SYSTEMS

The thesis is devoted to the development and research of methods for optimizing the modes of power supply systems for electrotechnical complexes and systems with asymmetric and nonlinear loads in order to increase energy parameters and calculate the parameters of symmetric-compensating devices that provide optimal modes by means of mathematical and computer models and using search optimization implemented using modern software of computer mathematics. Generalized algorithms for implementing search optimization using modern computer software packages have been developed. The possibilities of applying various optimization criteria for solving the problems of increasing the power indicators of power supply systems with asymmetrical and non-linear loads are shown.

Keywords: power supply system, asymmetry of currents and voltages, reactive power, symmetric-compensating device, power active filter, optimization variables, optimization criterion.

Вступ. Проблеми якості електричної енергії стають все більш нагальними тому що збільшується електроозброєність всіляких галузей і зростає номенклатура навантажень. При цьому в мережі зростають частки потужностей зсуву, несиметрії та спотворення, що значно погіршує основні енергетичні параметри електричної мережі [1]. Граничні значення цих параметрів задаються нормативними документами, однак на практиці контроль реальних значень здійснюється недостатньо.

Розвиток силової напівпровідникової техніки та мікроконтролерів відкриває нові можливості для покращання енергетичних показників в системах електропостачання.

Тому розробка нових методів аналізу електромагнітних процесів і синтезу симетро-компенсуючих пристроїв і силових активних фільтрів представляється актуальною.

Перспективними в цьому напрямку є методи, основані на використанні комп'ютерних моделей в поєднанні з оптимізаційними методами.

Метою статті є дослідження застосування пошукової оптимізації та комп'ютерних моделей для розв'язання задач покращання енергетичних показників систем електропостачання в трипровідних та чотирипровідних трифазних системах з несиметричними та з нелінійним навантаженнями.

Пошукова оптимізація. Під пошуковою оптимізацією стосовно задачі покращання енергетичних показників електротехнічних комплексів та систем будемо розуміти обчислювальний процес пошуку оптимальних режимів і параметрів електротехнічної системи за допомогою оптимізаційних алгоритмів і комп'ютерних програм з адаптацією до умов отримання рішення шляхом введення обмежень та корекцій, пов'язаних з фізичною реалізуемістю симетро-компенсуючих пристроїв.

При реалізації пошукової оптимізації необхідно визначити параметри оптимізації і сформулювати критерії оптимізації. Параметрами оптимізації можуть виступати параметри реактивних елементів симетро-компенсуючого пристрою, а при застосуванні силових активних фільтрів – амплітуда еталонних сигналів і початкова напруга на накопичувальному конденсаторі. Критеріями оптимізації можуть бути: баланс активних потужностей на навантаженні та на джерелах живлення, відсутність реактивної потужності, рівність амплітуд живильних струмів, або зменшення амплітуд живильних струмів до найменшого значення, зведення до нуля зворотної симетричної складової струму в трифазних трипровідних системах та подавлення нульової І0 і зворотної І2 симетричних складових, у випадку

чотирипровідних систем.

Якщо виходити з цих положень, то має сенс цільову функцію формувати у вигляді кульової метрики. Наприклад, кульова метрика, складена з реактивних потужностей джерел має такий вигляд:

$$M = \sqrt{Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2}. \quad (1)$$

Процес пошукової оптимізації може бути організованим в обчислювальному середовищі MATLAB шляхом взаємодії програмного забезпечення та візуальної моделі через робочий простір середовища моделювання. Реалізація пошукової оптимізації може бути здійснена за допомогою вбудованих функцій `fminsearch()`, яка працює із використанням алгоритму деформованого багатогранника, або `fminunc()` – із використанням методу Ньютон.

Інший спосіб реалізації пошукової оптимізації виконується за допомогою попередньо складеної математичної моделі електричної системи, яка оптимізується у пакеті MathCAD за допомогою блоку `given-find`.

Оптимізація режиму роботи трипровідної системи електропостачання.

Традиційно для симетрування струмів застосовуються симетро-компенсуючі пристрої, що представляють собою реактивні елементи, найчастіше косинусні конденсатори, які підключені між фазами [2]. Точне значення реактивних елементів симетро-компенсуючого пристрою можна розрахувати із використанням пошукової оптимізації.

Проведено дослідження несиметричного режиму роботи системи електропостачання з використанням математичного пакета MathCAD для вирішення сформованої математичної моделі, що складається з топологічних і компонентних рівнянь системи.

Для здійснення розрахунку параметрів симетро-компенсуючого пристрою в пакеті MathCAD з використанням пошукової оптимізації, змінні повної системи були доповнені комплексними опорами компенсуючих елементів. Умови компенсації реактивної потужності сформульовані у вигляді критерію нерівності нулю реактивної потужності, що віддається кожним джерелом е.р.с. Для реалізації симетро-компенсуючого пристрою виключно реактивними елементами, введені відповідні обмеження на відсутність дійсних частин у опорів цих елементів. Додатково введено також обмеження на знак уявної частини опорів симетро-компенсуючих елементів, який відповідає саме ємнісному характеру цих елементів.

Для схеми з прийнятими параметрами після завершення виконання пошукової оптимізації амплітуди струмів в найбільш навантажених фазах зменшилися в чотири рази, амплітуди напруг на вузлах навантаження стали однаковими, струми в кожній з фаз повністю збіглися за фазовими кутами з їх напругами.

Аналітичний метод розрахунку параметрів симетро-компенсуючого пристрою, не виконав повного симетрування струмів [3]. Суть методу

полягає в розрахунку струму зворотної послідовності по амплітудам несиметричних струмів мережі і подальшому обчисленні струмів симетруючого пристрою. Крім того, аналітичний метод не враховує можливість того, що навантаження несе індуктивний характер, внаслідок чого реактивна потужність не була скомпенсована.

Пошукова оптимізація параметрів симетро-компенсуючого пристрою була так само здійснена за допомогою візуальної моделі, створеної в системі SimPowerSystem (SPS) в програмі MATLAB. Перевагою такого методу є відсутність необхідності складання РІВНЯНЬ математичної моделі. Цільова функція сформована, як кульова метрика з реактивних потужностей.

Знайдені значення ємностей компенсуючих конденсаторів практично співпали з тими значеннями, які були обчислені в MathCAD.

На практиці вимірювання електричних показників здійснюється на стороні навантаження. Тому для здійснення умов, наближених для реальних, цільова функція формується шляхом вимірювань на стороні навантаження за допомогою фільтра симетричної складової зворотної послідовності, що представляє собою резистивно- ємнісний фільтр (рис. 1).

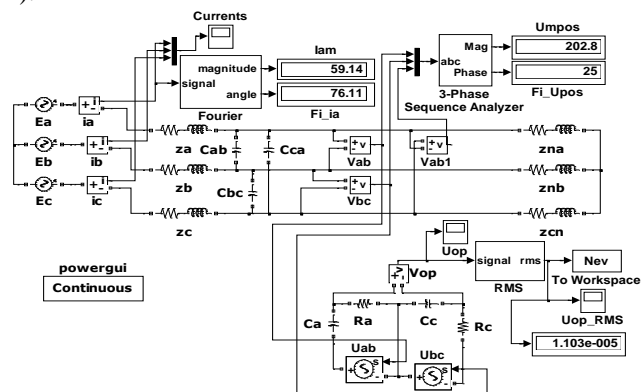


Рис.1 – Візуальна модель трифазної системи електропостачання з резистивно-ємнісним фільтром

При цьому в якості цільової функції використовується діюче значення вихідної напруги фільтра.

Слід зазначити, що в залежності від початково заданих значень в результаті оптимізації виходять різні варіанти значень ємностей симетруючих конденсаторів. При цьому для деяких варіантів може виникати перекомпенсація або недокомпенсація реактивної потужності. Для приведення системи до оптимального режиму запропонований метод обертання векторів струмів в лініях електропередачі шляхом зміни величин ємностей батарей конденсаторів на одну і ту ж величину. Найбільш прийнятною ознакою входу в оптимальний режим є зниження амплітуди лінійного струму до мінімуму. Передбачено варіант переходу до двоконденсаторного симетруючого пристрою, який здійснюється вирахуванням з величин ємностей триконденсаторного симетруючого пристрою ємності конденсатора з найменшою ємністю.

Оптимізація режиму роботи чотирипровідної системи електропостачання. При оптимізації режиму чотирипровідних трифазних систем із нульовим проводом для формування цільової функції використовуються три вихідні величини аналізаторів: амплітуда зворотної I_2 та амплітуда нульової I_0 послідовностей струмів, а також фаза ϕ_1 прямої послідовності. Симетро-компенсуючий пристрій представлено п'ятьма елементами, три елементи підключаються між фазами, а решта два – між фазами і нульовим проводом. Для вирішення задачі синтезу, спочатку всі типи елементів були задані, як конденсатори, а потім в процесі оптимізації виявлялося, які з елементів були призначені невірно. Сигналом на витіснення елемента було прагнення процесу оптимізації дати параметру оптимізації граничне значення. При цьому величина цільової функції перестає змінюватися, не досягаючи свого оптимального значення. В цьому випадку необхідно або виключити елемент шляхом його розірвання (закорочування), або змінити тип реактивного елемента на дуальний. Недоліком цього методу є те, що процес визначення типу елемента не є автоматичним, і потребує участі людини.

Автоматизація процесу оптимізації здійснена за рахунок підключення надлишкового числа параметрів оптимізації. Для автоматичного визначення типу елемента, використовується штучний прийом включення в кожній гілці симетро-компенсуючого пристрою пари шунтуючих один одного конденсатора і котушки індуктивності, що утворюють узагальнений реактивний елемент з можливістю одночасної зміни параметрів обох елементів в процесі оптимізації (рис. 2).

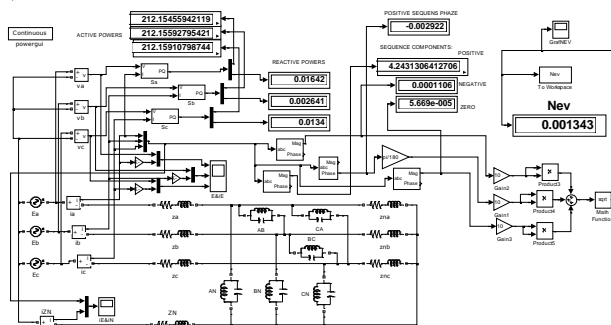


Рис. 2 – Візуальна модель чотирипровідної системи електропостачання

По завершенні процесу оптимізації необхідно виконати заміну пари кожного узагальненого реактивного елемента одним реактивним елементом, тип якого визначається превалюванням реактивності в узагальненому елементі, який слід замінити. Крім того, передбачена можливість переходу на п'ятиелементну схему пристрою, шляхом виключення такого надлишкового елемента, опір якого перевищує опори інших елементів на кілька порядків.

Розроблений метод визначення оптимального режиму, що базується на декомпозиції системи електропостачання, дозволяє визначити режимні параметри системи електропостачання без

підключення симетро-компенсуючого пристрою. Такий підхід дозволяє поліпшити збіжність процесів рішення і прискорити отримання параметрів оптимального режиму і синтезу симетро-компенсуючого пристрою. За допомогою запропонованого методу були отримані всі шість варіантів п'ятиелементного симетро-компенсуючого пристрою для чотирипровідної трифазної несиметричної системи.

Розрахунок параметрів симетро-компенсуючих пристроїв для двох паралельно ввімкнених споживачів з урахуванням вкладу кожного з них

Розрахунок параметрів симетрувальних пристроїв уряді робіт [2 – 4] проводиться на прикладі узагальненої системи, що складається з джерел електричної енергії, лінії електропередачі і несиметричним комплексним навантаженням. При цьому розрахунки проводяться для симетро-компенсуючого пристрою, фактично призначеного компенсувати реактивну потужність всього еквівалентного навантаження в даній точці приєднання, без врахування впливу кожного конкретного споживача на вклад в збільшення їм реактивної потужності в залежності від обладнання, яке споживає енергію в системі. У той же час раціональним представляється підхід, при якому кожен споживач відповідає за внесену ним частку в погіршення умов електроспоживання через несиметрію і реактивності навантаження [5, 6].

Розроблений метод дозволяє розрахувати параметри симетро-компенсуючих пристроїв для випадку двох несиметричних комплексних навантажень, включених паралельно, з урахуванням конкретного внеску кожного споживача щодо несиметрії і реактивної потужності в трифазній системі електропостачання (рис. 3).

Джерело енергії PE передає електроенергію споживачам Load1 і Load2 через лінію електропередачі PL. Розглядається паралельне включення навантажень, що обумовлює наявність одного загального пункту підключення споживачів (вузли a, b, c). Кожне з навантажень вносить свою частку реактивної потужності, обумовлену реактивним характером навантаження і несиметрією її параметрів. Симетро-компенсуючі пристрої SCD1 і SCD2 призначені для повної компенсації реактивних потужностей, що створюються кожним з навантажень. Завдяки такій постановці завдання, в кінцевому рахунку, досягається оптимальний режим при мінімізації втрат на ділянці лінії електропередачі PL.

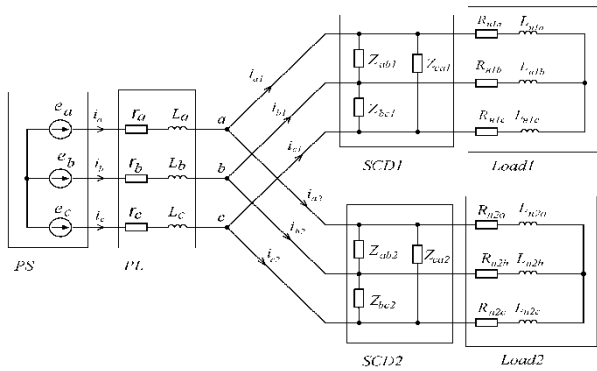


Рис. 3 – Принципова схема системи з двома паралельними навантаженнями

Візуальна модель системи, що досліджується (рис. 4) характеризується наступними параметрами:

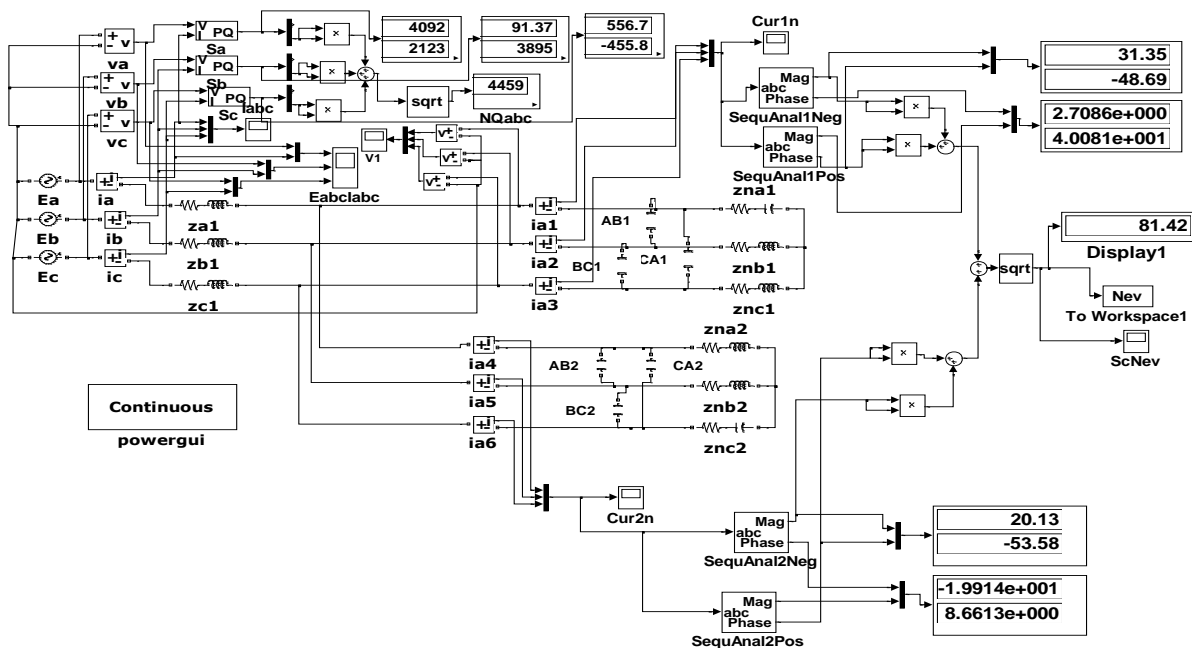


Рис. 4 - Візуальна модель системи електропостачання з двома споживачами

Аналіз несиметричного режиму демонструє різку різницю струмів по амплітудам у всіх лініях електропередачі (рис. 5, 6, 7). Напруги в пунктах підключення навантажень (a, b, c) істотно знижуються в порівнянні з номінальною амплітудою напруги 100 В. Фази струмів в лініях джерел не збігаються з фазами живильних напруг.

Показання віртуальних приладів для вимірювання активних і реактивних потужностей (рис. 4), свідчать про те, що джерела навантажені нерівномірно. Повні потужності, що віддаються джерелами, складають величини $S_{ea} = (4092 + j2123)$ ВА; $S_{eb} = (91.37 + j3895)$ ВА; $S_{ec} = (556.7 - j455.8)$ ВА.

живильні джерела мають амплітуди 100 В і частоту 50 Гц; комплексні опори ліній електропередачі прийняті рівними $z_1 = z_2 = (0.1 + j\omega 0.001)$ Ом. Навантаження включені за схемою зірки. Параметри першого навантаження: $z_{Ha1} = 0.7 - j\omega 0.005$; $z_{Hb1} = 1 + j\omega 0.04$; $z_{Hc1} = 2 + j\omega 0.04$. Параметри другого навантаження: $z_{Ha2} = 0.7 + j\omega 0.005$; $z_{Hb2} = 1 + j\omega 0.04$; $z_{Hc2} = 2 - j\omega 0.04$. Таким чином, в кожній з трифазних навантажень містяться несиметричні комплекси фазних навантажень, які відрізняються як за величинами, так і за типами реактивності. Такі параметри забезпечують роботу системи в різко несиметричному режимі зі значними рівнями реактивної потужності.

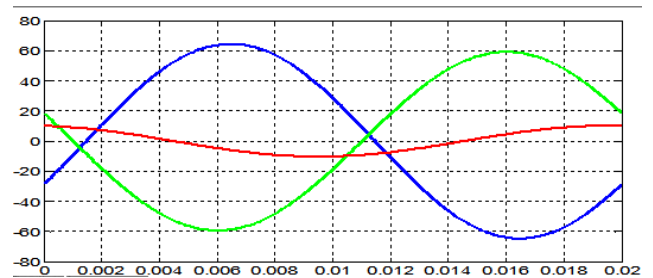


Рис. 5 – Діаграми струмів в лініях навантаження Load1

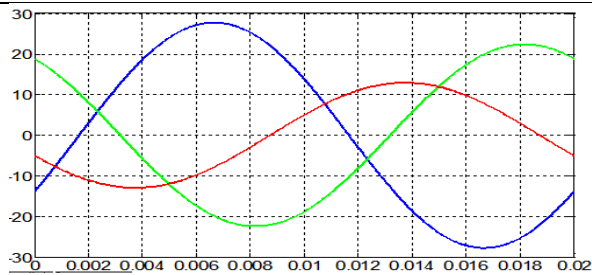


Рис. 6 – Діаграми струмів в лініях навантаження Load2

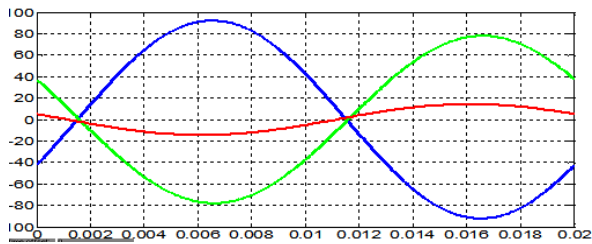


Рис. 7 – Діаграми струмів в лініях джерел живлення

З зіставлення діаграм видно, що струми різко відрізняються по амплітудам у всіх лініях електропередачі. Напруги в пунктах підключення навантажень (а, б, с) істотно знижуються в порівнянні з номінальною амплітудою напруги 100 В.

Визначення режиму повної компенсації реактивної потужності здійснюється методом пошукової оптимізації з використанням візуальної моделі. Метою пошукової оптимізації є знаходження параметрів симетро-компенсуючих пристроїв, при яких забезпечується компенсація реактивної потужності і усунення несиметрії струмів і напруг в системі.

Формування цільової функції, яка забезпечить справедливий розподіл компенсуючих реактивностей між SKU1 і SKU2, є ключовим завданням у вирішенні поставленої проблеми обліку вкладу кожного з навантажень в створення несиметрії і генерацію реактивної потужності.

Цільова функція N_{ss} формується як кульова метрика амплітуд зворотних послідовностей і значень фазових кутів прямих послідовностей для обох навантажень:

$$N_{ss} = \sqrt{ImNeg1^2 + \varphi Pos1^2 + ImNeg2^2 + \varphi Pos2^2} \quad (2)$$

де $ImNeg1$ і $ImNeg2$ – амплітудні значення зворотних симетричних складових для струмів у фідерах першого та другого навантажень відповідно;

$\varphi Pos1$ і $\varphi Pos2$ – фазові кути прямих симетричних складових для струмів у фідерах першого та другого навантажень відповідно.

Як програма оптимізації використовується вбудована функція $fminunc()$, що реалізує стратегію і алгоритм методу спряжених градієнтів.

Визначення типів симетро-компенсуючих елементів в ході оптимізації із використанням властивості процесу оптимізації витіснити ті елементи, які не сприяють знаходженню мінімуму.

В кінцевому рахунку були визначені наступні параметри симетро-компенсуючих пристроїв: $Cab1 = 1144.7698$ мкФ, $Cbc1 = 633.1286$ мкФ, $Lca1 = 0.019592$ Гн, $Cab2 = 673.3340$ мкФ, $Cbc2 = 23.3706$ мкФ, $Lca2 = 0.038555$ Гн. При цьому сталий симетричний режим характеризується наступними результатами. Амплітуди струмів, що протікають в лінії електропередачі для Load1 по фазах А, В і С складають величини 41.285А. Значення амплітуд струмів, що протікають в лінії електропередачі для Load2 рівні 7.87А.

Оптимізація режиму роботи із застосуванням силових активних фільтрів.

У разі нелінійного навантаження реактивну потужність доцільно компенсувати застосовуючи силові активні фільтри [7– 9]. Традиційно такі фільтри представляють собою мостові інвертори, зібрані на IGBT транзисторах з шунтуючими діодами, живлення яких здійснюється накопичувальним конденсатором. Компенсація реактивної потужності і симетрування струмів здійснюється сформованими фільтром струмами, що інжектуються у систему електропостачання через буферні дроселі.

Застосування методу пошукової оптимізації дозволяє уникнути складних перетворень Кларк і Парка для визначення параметрів фільтра, які оптимізують режим роботи системи електропостачання. При цьому необхідно, щоб транзистори управлялися таким чином, щоб в джерелах еталонного сигналу сформувалися такі коригувальні сигнали, які забезпечать в системі мінімізацію реактивної потужності. Слід зазначити, що параметром оптимізації буде амплітуда еталонного сигналу, яка буде однаковою для всіх трьох каналів управління.

Цільова функція може бути сформована, як різниця між сумою активних потужностей, заміряних на стороні джерел і на стороні навантаження. Для розглянутого випадку лінійного навантаження необхідно забезпечити також мінімізацію в кривих струмів джерел і коригувальних струмів вищих гармонік, що досягається включенням відповідних показників в цільову функцію.

Запуск процесу оптимізації може здійснюватися при заданні початкового значення напруги як рівного нулю, та і відмінного від нуля на накопичувальному конденсаторі інвертора. Тривалість цього процесу може бути відносно великою, що уповільнює процес оптимізації. Тому доцільно ставити значення початкової напруги на конденсаторі близьким до сталого значення.

Орієнтовно це значення визначається як вихідна напруга еквівалентного мостового випрямляча, що заряджає накопичувальний конденсатор інвертора. Це значення також може бути включено як складова цільової функції, і в цьому випадку рішення буде

знайдено, в тому числі і для сталого значення цієї напруги.

В результаті виконання оптимізації значення амплітуд струмів стало рівним 7,771117 А (рис. 9).

Сумарна реактивна потужність джерел при несиметрії 3283 ВАр звелася до значення 0,248 Вар (рис. 8).

Початкове значення напруги на накопичувальному конденсаторі приймалося нульовим, тому в першу чверть періоду протікає перехідний процес заряду конденсатора через зворотні діоди, які шунтують силові транзистори активного фільтра (рис. 10).

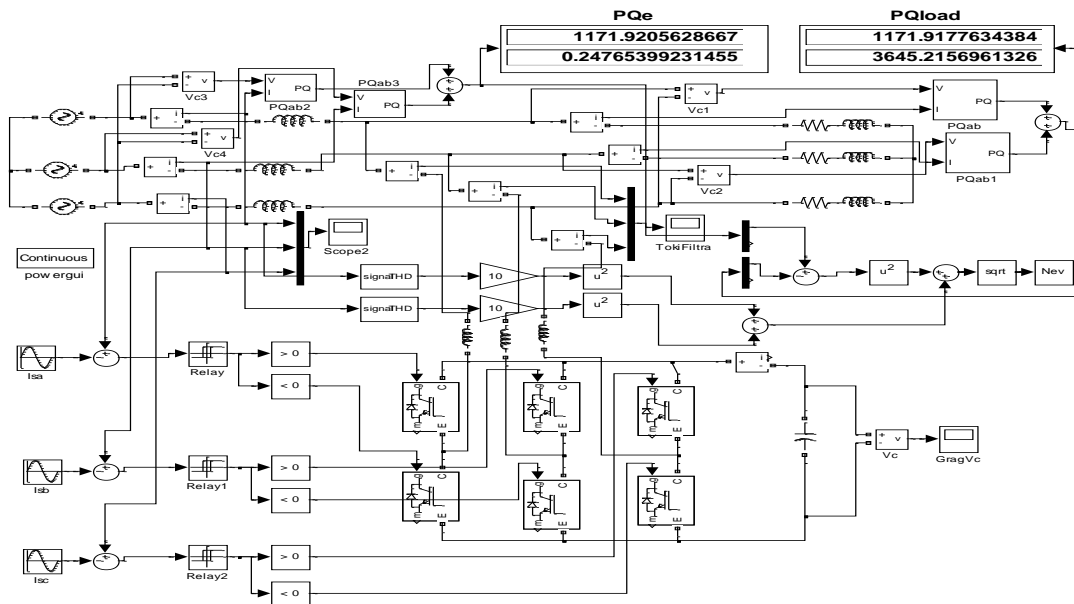


Рис. 8- Візуальна-модель системи електропостачання з паралельним силовим активним фільтром

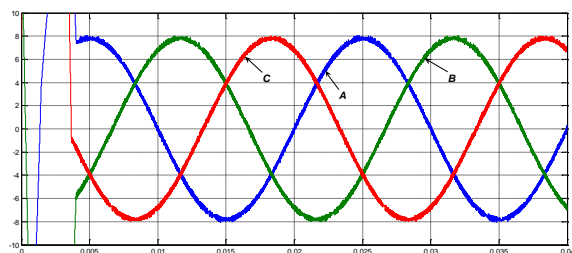


Рис. 9- Струми в лініях електропередачі після завершення оптимізації режиму

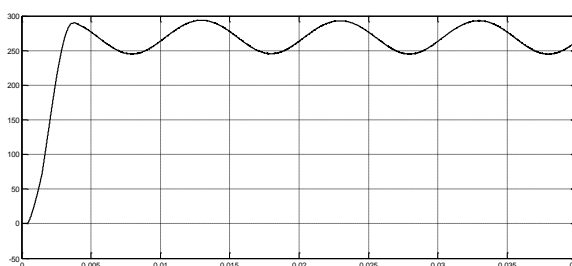


Рис. 10 - Напруга на накопичувальному конденсаторі силового активного фільтра

На інтервалі цього перехідного процесу транзистори замкнені і на керуючі сигнали не реагують. Накопичувальний конденсатор забирає на себе енергію, запасену в дроселях активного фільтра, тому напруга на конденсаторі перевищуватиме амплітуду живильної напруги, що живить джерела енергії.

При виході на рішення в процесі оптимізації після заряду конденсатора напруга на конденсаторі

змінюється за періодичним законом. В інших випадках напруга на конденсаторі або наростає (якщо конденсатор отримує від джерел напруги живлення надлишкову енергію), або зменшується (якщо енергія від джерел недостатня для підтримки роботи активного фільтра).

При надлишковій амплітуді еталонних сигналів спостерігається наростання напруги на накопичувальному конденсаторі, при недостатній же їх амплітуді напруга на конденсаторі прагне знизитися до нуля. Лише при оптимальному значенні амплітуд еталонних сигналів напруга на конденсаторі має періодично повторювану форму.

Тому критерієм оптимізації може служити періодичність напруги на накопичувальному конденсаторі, який виступає чутливим елементом щодо виконання умови врівноваженості потужностей в системі електропостачання. Таким чином цільова функція може бути сформована з дискретних значень напруги на конденсаторі, замірених на початку кожного періоду:

$$Nev = \sqrt{(V_{C5} - V_{C4})^2 + (V_{C4} - V_{C3})^2 + (V_{C3} - V_{C2})^2 + (V_0 - 300)^2} \quad (3)$$

де $V_{C2}, V_{C3}, V_{C4}, V_{C5}$ – напруги на конденсаторі в кінці 2, 3, 4 і 5 періодів;

V_0 – середнє значення напруги на конденсаторі.

Для реалізації сформованої цільової функції блок To Workspace Vc передає вектор дискретних значень напруг з моделі в програму. Цей блок налаштований таким чином, що значення напруги на

конденсаторі знімаються кожні 0.02 сек. Отримані дані зберігаються в масиві робочого простору, з елементів якого далі і формується перша частина цільової функції (3).

Для завдання певного рівня напруги на накопичувальному конденсаторі цільова функція доповнена другою частиною, яка представляє квадрат

різниці між значенням нульової гармоніки напруги і значенням, відповідним рівню напруги на конденсаторі, що задається. Реалізація такого розрахунку в моделі (рис. 11) здійснюється блоком виділення нульовий гармоніки Fourier і блоком передачі даних з моделі в робочий простір MATLAB To Workspace у вигляді змінної з ім'ям V0.

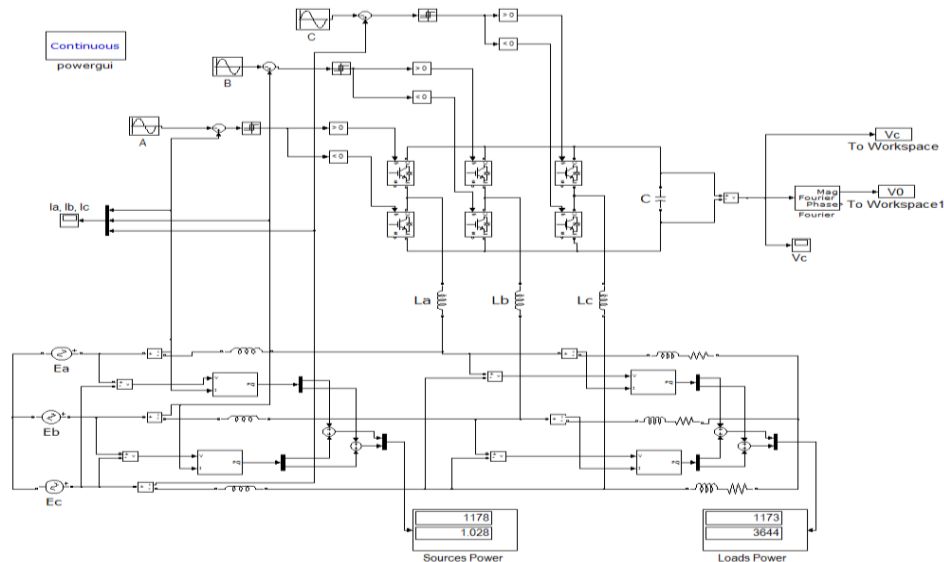


Рис. 11 – Візуальна модель несиметричної системи електропостачання з силовим фільтром

Слід зазначити, що в цільовій функції не використовуються значення напруги в перший період коливання, так як в цей момент часу відбувається перехідний процес, і дані з цього проміжку часу не є інформативними. Час роботи моделі налаштований на 0.1 сек.

Пошукова оптимізація була завершена після виконання 298 ітерацій, в результаті чого була визначена амплітуда еталонного сигналу рівна $I=7.7875A$, а також початкова напруга на конденсаторі $V_{C0} = 301.2154 V$. При цьому струми стали симетричними (рис. 12), а їх фази стали збігатися з відповідними фазами джерел напруг.

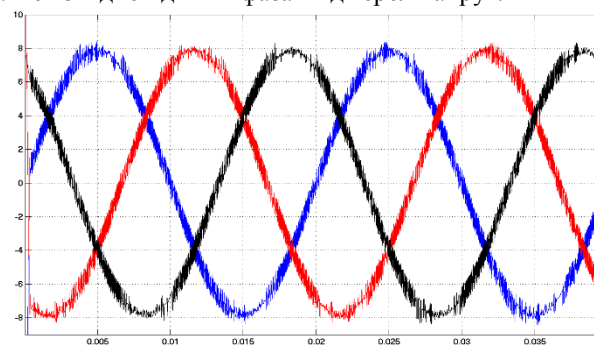


Рис. 12 - Діаграми мережних струмів після завершення виконання пошукової оптимізації

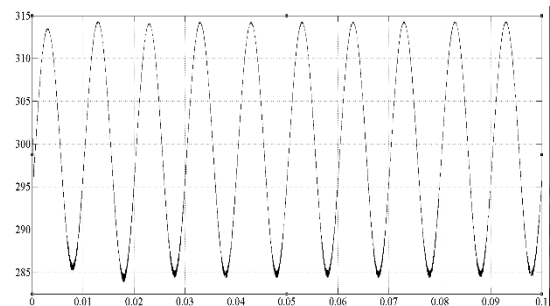


Рис. 13 - Пульсації напруги на конденсаторі САФ

Висновки

Розроблені критерії та визначені параметри оптимізації при оптимізації роботи системи електропостачання із підключенням симетрокомпенсуючого пристрою та силового активного фільтру. Застосування запропонованого методу на імітаційній моделі показало його працездатність і високу точність. Встановлено, що в процесі проведення пошукової оптимізації автоматично визначається раціональний режим роботи системи електропостачання із несиметричним навантаженням, який характеризується підвищенням коефіцієнта потужності, зменшенням амплітуди споживаного від мережі струму і істотним зниженням втрат в системі електропостачання. При цьому реактивна потужність повністю компенсується, а амплітудні значення струмів мережі істотно знижуються.

Список літератури

1. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.

2. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.
3. Веников В.А. Электрические сети / В.А.Веников, А.А.Глазунов, Л.А.Жуков и др. – М.:Высшая школа,1971. – 438 с.
4. Шидловский А. К., Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок / Шидловский А. К., Борисов Б.П.– Киев: Наукова думка, 1977.–159 с.
5. Сендерович Г.А. Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения / Г. А. Сендерович, А. В. Дяченко. – Електротехніка і Електромеханіка. - 2016. - №2. – С. 54-60.
6. Дерзкий В.Г., Расчет платы за реактивную мощность /Дерзкий В.Г., Скиба В.Ф. // Энергетика та електрифікація. – 2010. – №2. – С. 53–57.
7. Murat Kale. An adaptive band current controller for shunt active power / Murat Kale, Engin Ozdemir// Electric Power Systems Research. – 2005 – N. 73. – P. 113 – 119.
8. Розанов Ю.К. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – Електротехніка. – 1999. – № 4. – С. 28–32.
9. Чопик В.В. Просторово-векторне керування паралельними активними фільтрами / В.В.Чопик, В.М.Михальський, С.Й.Поліщук, В.М.Соболев // Технічна електродинаміка. – 2013. - №4. – С.34-41.

References (transliterated)

1. Zhezhelenko I.V. Kachestvo elektroenergii na promyshlennykh predpriyatiyakh / Zhezhelenko I.V., Sayenko YU.L.–4-ye izd., pererab. i dop. – M.: Energoatomizdat, 2005.–261 s.
2. Kuznetsov V. G. Snizheniye nesimmetrii i nesinusoidal'nosti napryazheniy v elektricheskikh setyakh / V. G. Kuznetsov, A. S. Grigor'yev, V. B. Danilyuk. – K.: Naukova dumka, 1992. – 240 s.
3. Venikov V.A. Elektricheskiye seti / V.A.Venikov, A.A.Glazunov, L.A.Zhukov i dr. – M.:Vysshaya shkola,1971. – 438 s.
4. Shidlovskiy A. K., Simmetrirovaniye odnofaznykh i dvukhplechevykh elektrotekhnologicheskikh ustanovok / Shidlovskiy A. K., Borisov B.P.– Kiyev: Naukova dumka, 1977.–159 s.
5. Senderovich G.A. Aktual'nost' opredeleniya otvetstvennosti za narusheniye kachestva elektroenergii po pokazatelyam kolebaniy napryazheniya / G.A. Senderovich, A.V. Dyachenko.– Yelektrotekhnika i Yelektromekhanika. 2016. №2. –S. 54 60.
6. Derzkiy V.G., Raschet platy za reaktivnyuyu moshchnost' /Derzkiy V.G., Skiba V.F. // Energetika ta yelektrifikatsiya. – 2010. – №2. – S. 53–57.
7. Murat Kale. An adaptive band current controller for shunt active power / Murat Kale, Engin Ozdemir// Electric Power Systems Research. – 2005 – N. 73. – P. 113 – 119.
8. Rozanov YU.K. Sovremennyye metody regulirovaniya kachestva elektroenergii sredstvami silovoy elektroniki / YU.K. Rozanov, M.V. Ryabchitskiy, A.A. Kvasnyuk – Elektrotekhnika. – 1999. – № 4. – S. 28–32.
9. Chopik V.V. Prostorovo-vektorne keruvannya paralel'nimi aktivnimi fil'trami / V.V.Chopik, V.M.Mikhal'skiy, S.Y.Polishchuk, V.M.Sobol'ev // Tekhnichna yelektrodinamika. – 2013. №4. – S.34-41.

Надійшла

(received)

03.12.2017

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ягуп Катерина Валеріївна (Ягуп Екатерина Валериевна, Yagup Katerina Valeriivna) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, м. Харків; тел.: (057) 731-30-40; e-mail: kata3140@gmail.com.

Ягуп Валерій Григорович (Ягуп Валерий Григорьевич, Yagup Valery Grigorovich) – доктор технічних наук, професор кафедри електропостачання міст, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, м. Харків; тел.: (057) 731-30-40; e-mail: yagup.walery@gmail.com.

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.